

УДК 620.179.14

**Б.М. ГОРКУНОВ**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
**С.Н. ГЛОБА**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
**Р.Л. ОСТРОВЕРХ**, НТУ "ХПИ" (г. Харьков)

## **ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПО ЧАСТОТЕ ПОЛЯ И КОЭФФИЦИЕНТУ ЗАПОЛНЕНИЯ**

В роботі розглянуті питання визначення робочого діапазону змінення частоти зондуючого електромагнітного поля та геометричних розмірів досліджуемого циліндричного металевого виробу при практичному використанні вихорострумового перетворювача для безконтактного контролю електричних, магнітних і геометричних параметрів зразків. Наведені таблиці та графічні залежності частоти та геометричних розмірів досліджуваних зразків, що забезпечують метрологічні характеристики вихорострумового перетворювача.

In work questions of definition of a working range of change of frequency of a sounding electromagnetic field and the geometrical sizes of a researched cylindrical metal product are considered at practical use of the vortex-current transformer for the non-contacting control of electric, magnetic and geometrical parameters of samples. Tables and graphic dependences of frequency and the geometrical sizes of researched samples that provides metrological characteristics of the vortex-current transformer are resulted.

**Постановка проблемы.** В большинстве случаев по результатам работ [1 – 3] видно, что рациональным, с точки зрения достижения высокой точности и чувствительности, является режим работы вихретокового преобразователя в диапазоне изменения  $2 < x < 4$ . Поэтому, для реализации вихретоковых методов, существуют границы применимости как по электрическим, магнитным и геометрическим параметрам исследуемого изделия, так и по частотному диапазону изменения электромагнитного поля.

**Анализ литературы.** К настоящему времени достаточно много работ посвящено усовершенствованию существующих и разработкам новых вихретоковых методов и устройств многопараметрового бесконтактного контроля электромагнитных и геометрических параметров металлических изделий [4 – 7]. В этих работах особое внимание уделено вопросам исследования поведения чувствительности и погрешности контроля вихретоковым преобразователем в широком диапазоне изменения обобщенного параметра  $x$ , который объединяет в себе геометрические, магнитные и электрические характеристики изделия. В случае цилиндрического изделия выражение для  $x$  будет иметь вид [8]

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\mu_0 \mu_r \omega}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр цилиндрического изделия, м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная

постоянная, Гн/м;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала изделия;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость материала изделия, См/м;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота зондирующего поля;  $f$  – частота тока в возбуждающей обмотке преобразователя, Гц.

К электромагнитным свойствам, связанным с возникающими вихревыми токами, относятся магнитная проницаемость материала и его удельная электрическая проводимость (электропроводность) или удельное электрическое сопротивление. Измерение электропроводности материалов в целом ряде случаев позволяет получить достаточную информацию об основном составе материала или о количестве примесей, о возникающих в исследуемом материале механических напряжениях или о степени его кристаллизации. Изменение магнитной проницаемости характеризует как состав материала, так и его физическое состояние. Изделия из одной марки стали при закалке, как известно, получают различную твердость и контроль степени закаливания изделий методом вихревых токов проводится бесконтактно и без всякого нарушения даже поверхностных слоев изделия.

**Цель статьи.** Данная работа посвящена вопросам практического использования метода вихревых токов с точки зрения выбора рационального частотного диапазона работы преобразователя или ограничение геометрических параметров исследуемого образца при заданных метрологических характеристиках. Теоретические исследования поведения вихревых токов сводятся к изучению взаимосвязи между параметрами намагничивающей катушки, их изменениями при внесении исследуемого образца и параметрами самого образца.

**Основной раздел.** Как известно, поверхностный эффект (скин-эффект) приводит к неравномерному распределению плотности вихревых токов по сечению тела [9]. В практике очень часто упрощают решение задачи и неравномерное распределение плотности вихревых токов заменяют равномерным распределением, но распространяющемся в теле на глубину  $\delta$ , а за плотность токов принимают плотность вихревых токов на поверхности тела.

В этом случае считают, что в теле на глубинах больше  $\delta$  вихревые токи отсутствуют, а выражение для определения глубины проникновения вихревых токов  $\delta$ , используя (1) и то, что  $x = d / \delta$ , имеет вид

$$\delta = \sqrt{2 / \mu_0 \mu_r \sigma \omega} . \quad (2)$$

Так как  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м и  $\omega = 2\pi f$ , то формулу (2) можно представить:

$$\delta = \frac{10^3}{2\pi} \sqrt{1 / f \mu_r \sigma} , \text{ [мм]} . \quad (3)$$

Это выражение позволяет определить глубину проникновения вихревых токов, а значит и глубину контроля физико-механического состояния различных материалов, для выбранных значений частоты зондирующего поля.

В таблице приведены значения глубины проникновения вихревых токов для наиболее встречающихся марок металлических изделий с характерными значениями электромагнитных параметров на различной частоте. В этой же таблице (колонки 5 и 14) приведены нижняя и верхняя границы рабочей частоты, по которой можно определить границы работоспособности вихретокового преобразователя.

Из выражения (2) видно, что для различных материалов при равенстве произведений  $\mu_r \sigma_1 f_1 = \mu_r \sigma_2 f_2 = \dots$  глубина проникновения вихревых токов будет одинакова.

Как известно, магнитные материалы имеют  $\mu_r \gg 1$ , а немагнитные материалы –  $\mu_r \approx 1$ . Поэтому вихретоковые методы для магнитных и немагнитных материалов принципиально различны. Из формулы (2) следует, что закон подобия для вихревых токов в немагнитном изделии при равенстве геометрических размеров двух тел имеет вид

$$f_1 \sigma_1 = f_2 \sigma_2. \quad (4)$$

Этот закон подобия позволяет результаты исследования одного образца распространить на другой, т.е. если нет ограничений в выборе частоты, то всегда можно подобрать частоту, удовлетворяющую условию (4).

Для магнитных материалов этот закон выражается условием

$$f_1 \mu_{r1} \sigma_1 = f_2 \mu_{r2} \sigma_2. \quad (5)$$

Так как магнитная проницаемость является величиной, зависящей от напряженности магнитного поля, то (5) выдержать сложнее, однако при малых значениях напряженности поля ( $H \leq 50$  А/м) для многих материалов эта зависимость очень слабая.

В общем случае, когда при одинаковой конфигурации поля геометрические размеры исследуемых образцов различны, закон подобия для любого цилиндрического металлического образца имеет вид

$$d_1 \sqrt{f_1 \mu_{r1} \sigma_1} = d_2 \sqrt{f_2 \mu_{r2} \sigma_2}, \quad (6)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – диаметры первого и второго исследуемого образцов.

Если для обоих стержней справедливо равенство (6), то распределение плотности вихревых токов, как и распределение напряженности магнитного поля по сечению стержней будет одинаково.

Таблица. Расчетные значения глубины проникновения электромагнитного поля для некоторых металлов и сплавов

материалы	Марка	Электр. проводн. $\sigma \cdot 10^7$ См/м	Относит. магнит. проницаемость $\mu_r$	Нижняя граница частоты $f_{\min}$ , Гц ( $\delta=50$ мм)	Глубина проникновения вихревых токов $\delta$ (в мм) на частотах								Верхняя граница частоты $f_{\max}$ , МГц ( $\delta=0,1$ мм)
					20 Гц	50 Гц	100 Гц	500 Гц	1 кГц	5 кГц	10 кГц	100 кГц	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
нечугунные	Медь М2	5,7	1	1,78	14,9	9,43	6,67	2,98	2,11	0,94	0,67	0,21	0,44
	Алюминий АД1М	3,54	1	2,86	18,9	12	8,46	3,78	2,67	1,2	0,85	0,27	0,72
	Алюм. сплав Д16Т	1,8	1	5,63	26,5	16,8	11,9	5,31	3,75	1,68	1,19	0,38	1,41
	Бронза БрОФ7-0,2	0,72	1	14,07	41,9	26,5	18,8	8,39	5,93	2,65	1,88	0,59	3,52
	ВТ-9	0,05	1	202,64	159	101	71,2	31,8	22,5	10,1	7,12	2,25	50,66
слабомангнитные	Латунь Л-63	1,56	1,003	6,48	28,5	18	12,7	5,69	4,02	1,8	1,27	0,4	1,62
	Латунь Л-59-1	1,41	1,02	7,04	29,7	18,8	13,3	5,94	4,2	1,88	1,33	0,42	1,76
	Нерж. сталь 12Х18Н9Т	0,131	1,04	74,37	96,4	61	43,1	19,3	13,6	6,1	4,31	1,36	18,59
	Парамагнит. чугуны	0,068	1,2	124,17	125	78,8	55,7	24,9	17,6	7,88	5,57	1,76	31,04
	Бронза БрАЖ9-4	0,54	1,22	15,38	43,9	27,7	19,6	8,77	6,2	2,77	1,96	0,62	3,84
	Нерж. сталь 12Х18Н10Т	0,14	1,55	46,69	76,4	48,3	34,2	15,3	10,8	4,83	3,42	1,08	11,67
ферромагнитные	Сталь 9Х18	0,5	70	0,29	6,02	3,8	2,69	1,2	0,85	0,38	0,27	0,09	0,07
	Сталь 45	0,47	80	0,27	5,8	3,67	2,6	1,16	0,82	0,37	0,26	0,08	0,07
	Сталь А20	0,56	125	0,14	4,25	2,69	1,9	0,85	0,6	0,27	0,19	0,06	0,04
	Сталь 08 кп	0,72	250	0,06	2,65	1,68	1,19	0,53	0,38	0,17	0,12	0,04	0,01
	Сталь 2112	0,5	500	0,04	2,25	1,42	1,01	0,45	0,32	0,14	0,1	0,03	0,01
	Аморфный 45НПР-А	0,07	1000	0,14	4,25	2,69	1,9	0,85	0,6	0,27	0,19	0,06	0,04
	Пермаллой 50НХС	0,2	10000	0,01	0,8	0,5	0,36	0,16	0,11	0,05	0,04	0,01	0,001

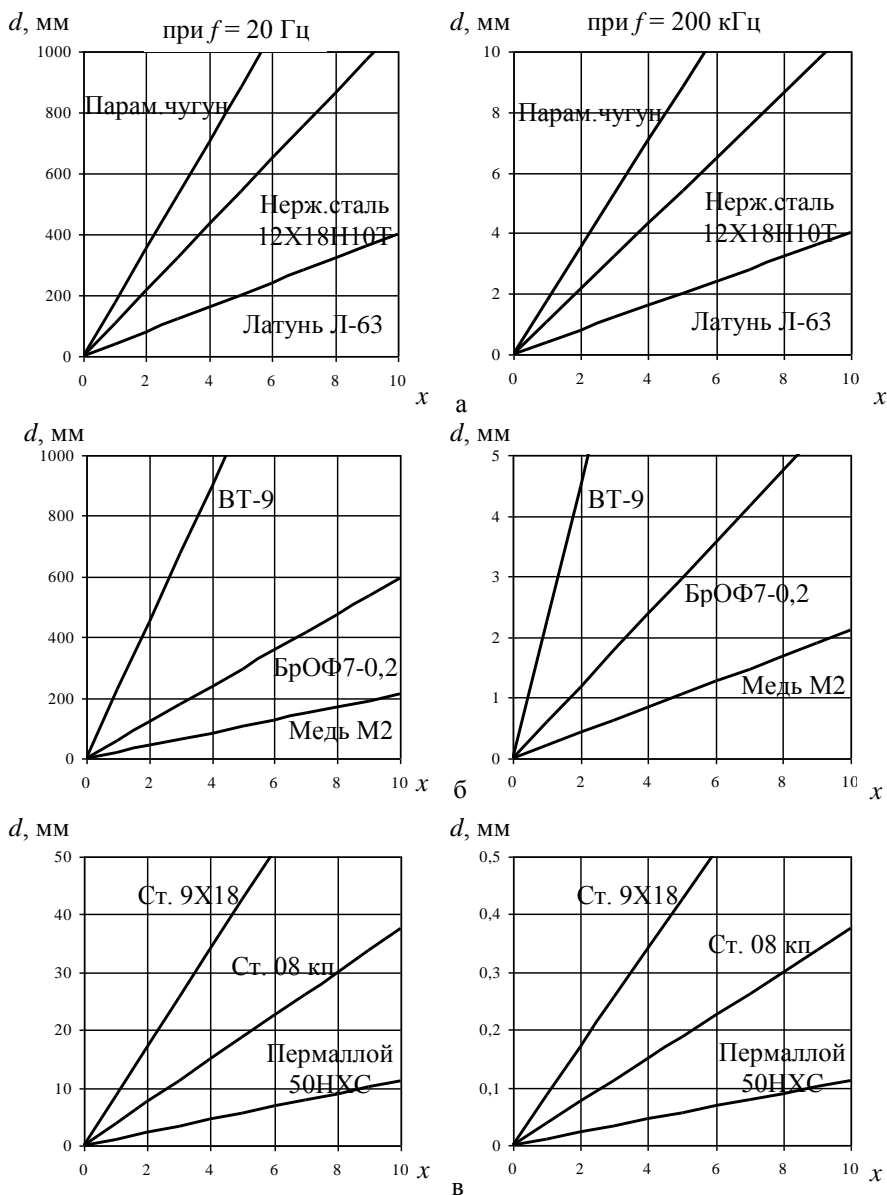


Рис. 1. Зависимости диаметров исследуемых образцов от обобщенного параметра  $x$  при фиксированных значениях частоты (20 Гц и 200 кГц) для слабомагнитных (а), немагнитных (б) и ферромагнитных (в) образцов

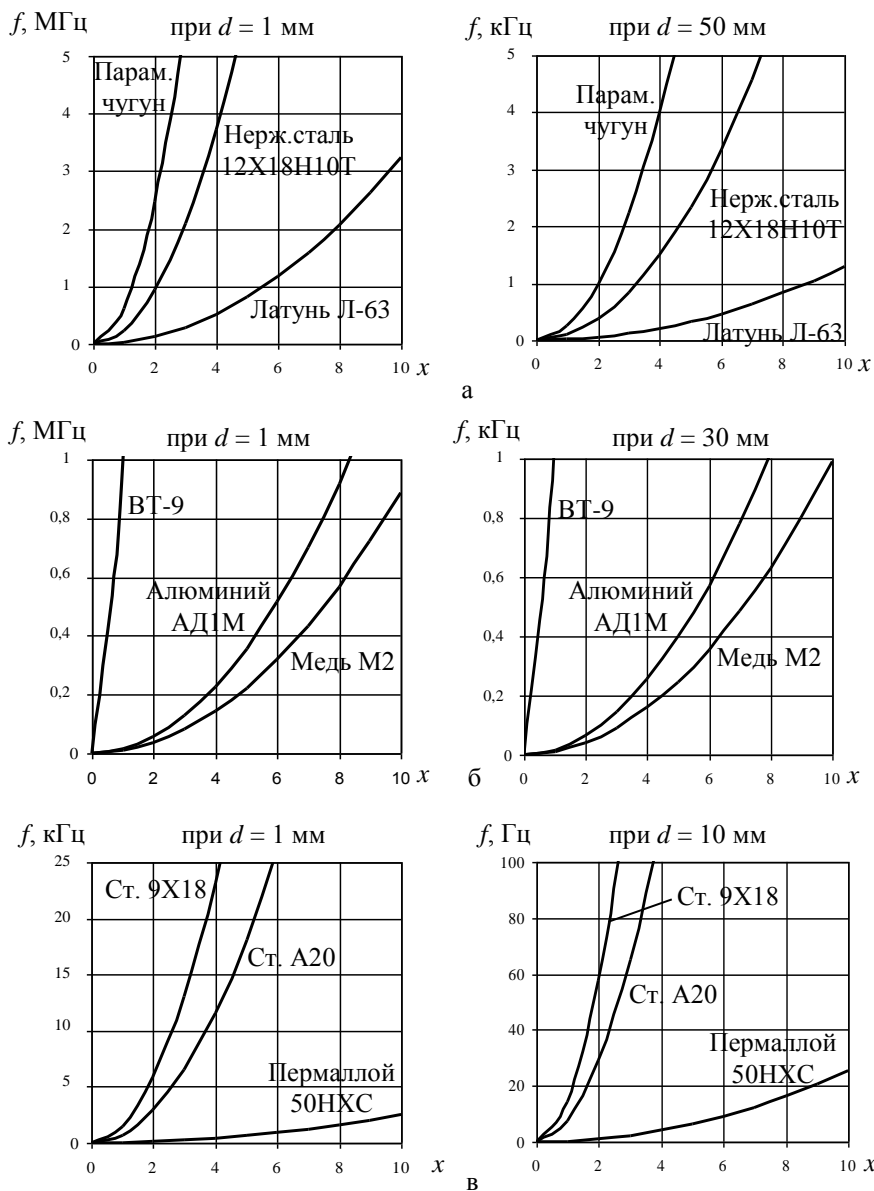


Рис. 2. Зависимости частоты зондирующего электромагнитного поля от обобщенного параметра  $x$  при фиксированных значениях диаметров для слабомагнитных (а), немагнитных (б) и ферромагнитных (в) образцов

Используя выражение (3) можно построить семейство зависимостей геометрических размеров (диаметров) исследуемых образцов от обобщенного параметра  $x$  для немагнитных, слабомагнитных и ферромагнитных образцов.

На рис. 1 приведены эти зависимости для двух граничных, с точки зрения практического использования вихретокового преобразователя, значений частоты зондирующего магнитного поля. Считая, что оптимальным по точности режимом работы преобразователя является диапазон изменения  $2 \leq x \leq 4$ , можно выделить границы изменения геометрических размеров контролируемых металлических образцов, которые, к примеру, для частоты поля 20 Гц, в случае использования немагнитных образцов составляют для медного образца  $25 \text{ мм} \leq d \leq 50 \text{ мм}$ . На рис. 2 приведены зависимости частоты зондирующего электромагнитного поля преобразователя от обобщенного параметра  $x$  при фиксированных значениях диаметров для немагнитных, слабомагнитных и ферромагнитных образцов. Эти зависимости позволяют определить оптимальный диапазон рабочих частот преобразователя при использовании образцов с различными геометрическими. Для образца из пермаллоя с диаметром  $d = 10 \text{ мм}$  граничная частота равна 10 Гц.

**Выводы.** Таким образом, использование гистограмм, представленных на рис. 1 и 2, позволяют без проведения предварительных испытаний выбрать оптимальную рабочую частоту электромагнитного преобразователя и установить верхнюю и нижнюю границы геометрических размеров для конкретного испытуемого образца, т.е. не проводя глубоких теоретических и экспериментальных исследований, можно ответить на вопрос об эффективности применения вихретокового метода неразрушающего контроля для конкретного образца.

**Список литературы:** 1. Бондаренко В.И., Горкунов Б.М., Себко В.П. К оценке погрешностей проходного вихретокового преобразователя при многопараметровых измерениях // Дефектоскопия. – 1984. – № 6. – С. 84 – 89. 2. Бондаренко В.И., Горкунов Б.М., Себко В.П. и др. Бесконтактное измерение электромагнитных характеристик цилиндрических изделий // Измерительная техника. – 1984. – № 6. – С. 57 – 58. 3. Горкунов Б.М., Львов С.Г. Вихретоковый двухпараметровый контроль немагнитных цилиндрических изделий. – Вестник НТУ "ХПИ". – 2004. – Вып. 7. – С. 43 – 49. 4. Неразрушающий контроль металлов и изделий / Под ред. Г.С.Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 486 с. 5. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль / Под ред. В.В.Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с. 6. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник: Т. 2 / Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с. 7. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г.Герасимов, В.В.Клюев, В.Е.Шатерников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с. 8. Дорофеев А.Л., Ершов Р.Е. Физические основы электромагнитной структуроскопии. – Новосибирск: Наука, 1985. – 284 с. 9. Шумиловский Н.Н., Ярмольчук Г.Г., Грабовецкий В.П. Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества, метод вихревых токов. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 176 с.

Поступила в редакцию 18.09.2004